

Disolventes eutécticos profundos, una alternativa verde para la recuperación de metales de desechos electrónicos

David Hernández Pérez

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco
dahepe@azc.uam.mx

Jorge Iván Aldana González

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco
jiag@azc.uam.mx

Nayeli Berenice Sánchez Piñón

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco
nbsp@azc.uam.mx

Manuel Eduardo Palomar Pardavé

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco
mepp@azc.uam.mx

Resumen

El incremento desmedido de desechos electrónicos, generado por el uso cotidiano de la tecnología, ha dado como resultado una acumulación de éstos y con ello una preocupación generalizada sobre el tratamiento y manejo de dichos residuos. En el presente trabajo se aborda la implementación de los disolventes eutécticos profundos (DES) para la recuperación de metales de alto valor a partir de los residuos electrónicos, una excelente alternativa, amigable con el medio ambiente, que ha presentado resultados prometedores.

Palabras clave

Recuperación, metales y disolventes verdes.

Abstract

The excessive increase in e-waste generated by everyday use has resulted in an accumulation and, consequently, widespread concern about its treatment and management. This paper addresses the implementation of deep eutectic solvents (DES) for the recovery of high-value metals from e-waste as an excellent, environmentally friendly alternative that has yielded promising results.

Keywords

Recovery, metals, green solvents.

APA: Hernández, D., Aldana, J., Sánchez, N. y Palomar, M. (2025). Disolventes eutécticos profundos, una alternativa verde para la recuperación de metales de desechos electrónicos. *Azcatl*, 5, 12-16. DOI: [10.24275/AZC2025B003](https://doi.org/10.24275/AZC2025B003)

Introducción

Los desechos electrónicos, también llamados *e-waste*, son dispositivos que llegaron al final de su vida útil, es decir, tecnología que dejó de ser funcional o de utilidad, ya sea por el desgaste generado por el tiempo de uso, por el avance tecnológico o por la conocida obsolescencia programada, la cual es planeada por estrategias de mercado (Dutta *et al.*, 2023). Sabemos que los electrodomésticos comprenden gran parte de los dispositivos utilizados de manera cotidiana en el hogar, lo que conlleva un crecimiento constante del número de residuos generado por las grandes urbes.

La importancia de estos dispositivos se centra en su contenido de elementos metálicos de valor agregado, como son metales preciosos (Au, Ag, Pt, Pd), tierras raras (Li, La, Nd, Dy) y metales de transición (Co, Ni, Mn, Zn) (Zheng *et al.*, 2024). La metodología tradicional para recuperar metales a partir de desechos electrónicos usando medios acuosos, como ácidos o mezclas de ácidos en altas concentraciones, tiene porcentajes altos de efectividad, cercanos al 100 %, sin embargo, presenta ciertas desventajas, destacando la corrosividad elevada y los elevados costos de operación, así como altos consumos energéticos. El manejo inadecuado de esta metodología puede causar daños a los ecosistemas del medio ambiente (Shahabuddin *et al.*, 2023). Es por ello que la aparición de alternativas *verdes* como la fitominería, biolixiviación, biometalurgia, microminería, biosorción, entre otras, han sido de gran interés para la recuperación de metales, no obstante, también presentan algunas desventajas importantes: su cinética de reacción es lenta, tienen baja selectividad y conllevan el uso de altas cantidades de agua, lo cual limita su aplicación.

Disolventes eutécticos profundos (DES)

Son un tipo de líquidos iónicos que surgieron a partir del año 2004; dentro de sus características principales destaca que sus puntos de fusión son bastante bajos en comparación con sus componentes de manera individual, llegando a ser completamente líquidos a temperatura ambiente. Además, son biodegradables, presentan alta selectividad, son capaces de formar complejos, pre-

sentan alta estabilidad térmica y química, son de fácil preparación, presentan ventanas de potencial más amplias que otros disolventes, son baratos y la generación de subproductos tóxicos es baja en comparación con otros medios empleados (Aldana *et al.*, 2024; Smith *et al.*, 2014). Todas las características antes mencionadas son fundamentales para su selección como medios electrolíticos y lixiviantes para la recuperación de metales. Además, se ha encontrado que la solubilidad de las especies en los DES está parcialmente relacionada con el pH; mientras que los cloruros metálicos se disuelven preferentemente en DES que presentan características neutras, en el caso contrario, los óxidos metálicos tienen mayor solubilidad en DES ácidos. Lo anterior está fuertemente relacionado con los mecanismos de disolución de las especies que se centran en dos pasos: el primero implica la adsorción de ligandos aniónicos sobre la superficie de la especie metálica, que resulta en una formación de complejos, y el segundo consta de la disolución del complejo formado en la superficie de la solución del DES (Gholami *et al.*, 2025). En este sentido la electrodeposición metálica es una excelente opción para realizar procesos de recuperación de metales a partir de soluciones electrolíticas, ya que presenta ventajas como alta selectividad, alta pureza del material obtenido y al no generar residuos sólidos es bastante amigable con el medio ambiente; además, con el uso de esta técnica es posible retirar metales de los DES, lo que permite la reutilización de los mismos (Zhao *et al.*, 2025).

Recuperación de metales de pilas gastadas

Dentro de las investigaciones centradas en el uso de los DES para la recuperación de metales, mostrados en la Tabla 1, se encuentra el estudio de recuperación de plata (Ag) a partir de baterías de óxido de plata tipo botón, para el cual se utilizó una mezcla de cloruro de acetilcolina y urea como medio lixivante y electrolítico, bajo condiciones experimentales de un tiempo de lixiviación de 24 horas a 70 °C (Sánchez *et al.*, 2021). Otro metal de transición como el cobalto (Co) se recuperó a partir de pilas gastadas de ion de litio (LiB) usando cloruro de colina y urea (reline); a partir del cátodo y lixiviando por 24 ho-

Tabla 1. Recuperación de metales empleando disolventes eutécticos profundos.

Materiales lixiviados	Elemento	DES	Recuperación/%	Referencia
Baterías de plata tipo botón	Ag	Reline	93	Sánchez <i>et al.</i> , 2021
Baterías de ion de litio	Co	Reline	-	Aldana <i>et al.</i> , 2022
Baterías alcalinas	Mn y Zn	Reline	-	Aldana <i>et al.</i> , 2022
Baterías níquel-metal hidruro	Ni y Co	Reline	64 y 36	Landa <i>et al.</i> , 2020
Imanes permanentes	Nd	Cloruro de colina/ácido salicílico	97	Varghese <i>et al.</i> , 2024
		Etilenglicol y ácido maleico	28	Yang <i>et al.</i> , 2024
		Reline y ethaline	-	Hernández, 2024

ras a 90 °C se encontró una concentración estimada de Co (II) de 23.3 ± 0.7 mM (Aldana *et al.*, 2022). A partir del cátodo de las baterías alcalinas gastadas y usando como medio lixivante un DES reline, se realizó la electrorecuperación de la aleación de Manganeseo-Zinc (Mn-Zn) después de 20 horas a una temperatura de 70 °C (Aldana *et al.*, 2019). Utilizando el mismo DES reline se logró recuperar Ni y Co a partir de baterías gastadas de Ni-HM; dichos depósitos estaban formados por Ni y Co, lo que sugiere la formación de una aleación bimetálica sobre el electrodo de trabajo, esto fue comparado usando una concentración de 2 M de ácido sulfúrico (H₂SO₄) y se demostró que con el DES fue factible recuperar dichos elementos con porcentajes altos (Landa *et al.*, 2020).

Recuperación de tierras raras de desechos electrónicos

En los últimos años, la recuperación de tierras raras (REE) ha sido de vital importancia para los investigadores, no sólo por sus aplicaciones, sino porque dichos elementos se encuentran en un bajo porcentaje en la corteza terrestres (Guo *et al.*, 2024). Enfocándonos en el uso de los DES, existen pocas investigaciones sobre el empleo de estos disolventes, sin embargo, ha sido posible recuperar Nd a partir de polvos de imán permanentes de Nd-FeB gastados usando ácido salicílico (SA) y cloruro de colina (ChCl) a 60 °C y 200 rpm (Varghese *et al.*, 2024).

Asimismo, se ha realizado la extracción selectiva de Nd de los imanes de NdFeB usando etilenglicol (EG) y

ácido maleico en condiciones de 80 °C, 5 horas y 700 rpm (Yang *et al.*, 2024). Finalmente, se ha demostrado que es posible electrorecuperar Nd y Fe a partir de imanes gastados de discos duros de computadoras empleando dos DES, utilizando reline, cloruro de colina y etilenglicol (ethaline).

Además de lograr recuperar dichos elementos, se estudió el efecto de temperaturas de 25-70 °C en dicha recuperación, lo que abre un nuevo camino al desarrollo de métodos de extracción con enfoque ambiental (Hernández, 2024).

Conclusiones

Los disolventes eutécticos profundos (DES) son una alternativa viable, así como sostenible, para la recuperación de metales realizando un reciclaje de materiales de desechos de dispositivos electrónicos y baterías. Se ha demostrado que los porcentajes de recuperación de elementos metálicos son bastante prometedores, no obstante, es importante destacar que la investigación de estos disolventes está en una etapa muy temprana. Por lo anterior, es importante ampliar el campo de estudio para el desarrollo de nuevos DES y realizar la combinación con otras técnicas o explorar otro tipo de desechos.

Además, la optimización de parámetros, como tiempo de lixiviación, temperatura, condiciones hidrodinámicas y pH, es importante para determinar el efecto que esta optimización tiene sobre las tasas de recuperación de metales y su viabilidad en la implementación industrial.

Referencias

- Aldana, J., Landa, M., Hernández, D., Maldonado, B., Sánchez, W., Montes de Oca, M. G., Romero, M. y Arce, E. M. (2024). Electronucleation and growth of metals from aqueous and non-aqueous solvents. *Nucleation and Growth in Applied Materials*, 65-100. doi: [10.1016/b978-0-323-99537-5.00013-1](https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99537-5.00013-1)
- Aldana, J., Sampayo, A., Hernández, D., Montes de Oca, M. G., Arce, E. M., Ramírez, M. T., Morales, P., Romero, M., Mugica, V. y Palomar, M. (2022). Electrochemical nucleation and growth of cobalt after leaching waste lithium-ion batteries using a deep eutectic solvent. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(10). doi: [10.1149/1945-7111/AC96B3](https://doi.org/10.1149/1945-7111/AC96B3)
- Aldana, J., Sampayo, A., Montes de Oca, M. G., Sánchez, W., Ramírez, M. T., Arce, E. M., Romero, M. y Palomar, M. (2019). Electrochemical nucleation and growth of mn and Mn-Zn alloy from leached liquors of spent alkaline batteries using a deep eutectic solvent. *Journal of the Electrochemical Society*, 166. doi: [10.1149/2.0761906jes](https://doi.org/10.1149/2.0761906jes)
- Dutta, D., Rautela, R., Gujjala, L. K. S., Kundu, D., Sharma, P., Tembhare, M. y Kumar, S. (2023). A review on recovery processes of metals from e-waste: a green perspective. *Science of the Total Environment*, 859. doi: [10.1016/j.scitotenv.2022.160391](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160391)
- Gholami, S., Pérez-Page, M., D'Agostino, C. y Esteban, J. (2025). (Deep) eutectic solvents for the separation of platinum group metals and rare earth elements: characteristics, extraction mechanisms and state of the art. *Chemical Engineering Journal*, 505. doi: [10.1016/j.cej.2025.159497](https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159497)
- Guo, M., Deng, R., Gao, M., Xu, C. y Zhang, Q. (2024). Sustainable recovery of metals from e-waste using deep eutectic solvents: advances, challenges, and perspectives. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 47. doi: [10.1016/j.cogsc.2024.100913](https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100913)
- Hernández, D. (2024). *Electrodepósito de neodimio a partir de desechos electrónicos empleando disolventes eutécticos profundos* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Landa, M., Aldana, J., Montes de Oca, M. G., Romero, M., Arce, E. M. y Palomar, M. (2020). Ni-Co alloy electrodeposition from the cathode powder of Ni-MH spent batteries leached with a deep eutectic solvent (reline). *Journal of Alloys and Compounds*, 830. doi: [10.1016/j.jallcom.2020.154650](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154650)
- Sánchez, W., Aldana, J., Manh, T., Romero, M., Mejía, I., Ramírez, M. T., Arce, E. M., Mugica, V. y Palomar, M. (2021). A deep eutectic solvent as leaching agent and electrolytic bath for silver recovery from spent silver oxide batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 168(1). doi: [10.1149/1945-7111/ABDB01](https://doi.org/10.1149/1945-7111/ABDB01)
- Shahabuddin, M., Uddin, M. N., Chowdhury, J. I., Ahmed, S. F., Uddin, M. N., Mofijur, M. y Uddin, M. A. (2023). A review of the recent development, challenges, and opportunities of electronic waste (e-waste). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), 4513-4520. doi: [10.1007/S13762-022-04274-W](https://doi.org/10.1007/S13762-022-04274-W)
- Smith, E. L., Abbott, A. P. y Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DES) and their applications. *Chemical Reviews*, 114(21), 11060-11082. doi: [10.1021/cr300162p](https://doi.org/10.1021/cr300162p)
- Varghese, A. T., Malar, C. G., Seenuvasan, M. y Jayapradha, V. (2024). Neodymium recovery from permanent magnets: a breakthrough approach using deep eutectic solvents and mica. *Journal of Molecular Liquids*, 394. doi: [10.1016/j.molliq.2023.123690](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123690)
- Yang, Q., Li, Y., Li, B., Duan, P., Ren, Z. y Zhou, Z. (2024). Selective leaching and recovery of neodymium from NdFeB carbonyl residues. *Separation and Purification Technology*, 329. doi: [10.1016/j.seppur.2023.125137](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125137)
- Zhao, W., Huang, J., Fu, Y., Yue, T. y Hu, W. (2025). Comparison study of three universal methods for the recovery and purification of valuable heavy metals from electroplating sludge. *Separation and*

Purification Technology, 352. doi: [10.1016/j.seppur.2024.128009](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128009)

Zheng, S., Yang, S., Chen, J., Wu, D., Qi, B., Zhang, C., Deng, W., Li, J., Mei, T., Wang, S. y Wan, L. (2024). New progresses in efficient, selective, and environmentally friendly recovery of valuable metal from e-waste and industrial catalysts. *Advanced Sustainable Systems*, 8(6). doi: [10.1002/adsu.202300512](https://doi.org/10.1002/adsu.202300512)